

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 28 年 5 月 30 日現在

機関番号：12501

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25390092

研究課題名(和文) テラヘルツ光における波面計測の確立とトポロジカル光波への展開

研究課題名(英文) Topological terahertz photonics

## 研究代表者

宮本 克彦 (Miyamoto, Katsuhiko)

千葉大学・融合科学研究科(研究院)・准教授

研究者番号：20375158

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,000,000円

研究成果の概要(和文)：本研究の目的は、光渦の未踏領域であったテラヘルツ領域における高効率光渦発生である。テラヘルツ領域において、高透過および屈折率周波数分散の非常に小さな樹脂を用いてテラヘルツ用螺旋型位相板を開発した。これを周波数可変テラヘルツ光源に応用することでテラヘルツ光渦の発生に成功した。また、光渦の次数および符号についてもテラヘルツカメラを用いた測定において特定できた。

研究成果の概要(英文)：An optical vortex can exhibit an annular intensity profile characterized by a topological charge of  $l$  that originates from a phase singularity. This phenomenon enables us to enrich many research areas, such as super-resolution microscopy, and chiral fabrications. Most of the optical vortices studies have concerned the frequency range from the visible to middle infrared region. We here focus on the terahertz (THz) region, which includes various fingerprint spectra of molecules and clusters.

A THz spiral phase plate (SPP) having high transmission and extremely low frequency dispersion, based on the Tsurupica polymer, has been developed, thereby efficiently generating THz optical vortices. We have successfully demonstrated THz vortex output by using a Tsurupica SPP and tunable THz source. The magnitude and sign of the topological charge of THz vortex output were also observed by utilizing the tilted lens focusing and radial defect introduction techniques.

研究分野：量子エレクトロニクス

キーワード：テラヘルツ 光渦 THz 軌道角運動量 顕微鏡

1. 研究開始当初の背景

位相特異点由来する角運動量(これを軌道角運動量と言う)とドーナツ状の強度分布を有する光を総称して光渦と呼ぶ。光渦の代表例はラゲルガウスビームである。円筒座標系における波動方程式の固有解であるラゲルガウスビームは、回転中心の周りで1波長伝搬するごとに  $2\pi$  の整数倍だけ位相が回転する周期的境界条件を満たす。そのため、光渦の次数  $l$  ( $l=1, 2, 3, \dots$ ) を用いて軌道角運動量の大きさを表すことができる。光渦の特徴であるドーナツ型の強度分布を利用した光渦の応用例として、超高解像顕微鏡が挙げられる。励起光と消去光が空間的に重なった部分で誘導放出による蛍光消去が起こることを利用して、蛍光信号の空間分解能を向上させる手法である。この手法を用いると空間分解能は光の波長で制限されず、励起波長の10分の1以下の空間分解能が達成できる。波長が長いテラヘルツ領域では、高い空間分解能で顕微分光することが難しい。テラヘルツ光渦発生が実現できれば、テラヘルツ分光の空間分解能が波長に制限されず飛躍的に向上することが期待できる。

2. 研究の目的

本研究の目的は、テラヘルツ領域においてこれまで発生が難しかったテラヘルツ光渦の発生を実現することである。主な目的は、高効率にテラヘルツ光渦を発生するためのテラヘルツ用位相板の開発、を用いてテラヘルツ光渦を発生させ光渦の次数および符号の同定、を行うことである。

3. 研究の方法

テラヘルツ光渦を発生させるための最も有効な方法は螺旋型位相板による波面変換である。しかしながら、テラヘルツ光の特徴から様々な因子が障害となり、実用性の高いデバイスはこれまで存在しなかった。そこで、近年テラヘルツ領域の光学材料として使用されている Tsurupica 樹脂に着目しテラヘルツ用螺旋型位相板を開発した。この材料は、テラヘルツ領域および可視域において高い透明性(図1)を示す。よって、ガイド光である可視光をテラヘルツ光と同軸に伝搬させることで、可視化が難しいテラヘルツ光を簡単に撮ることが可能である。さらに、屈折率の周波数分散が小さい(屈折率

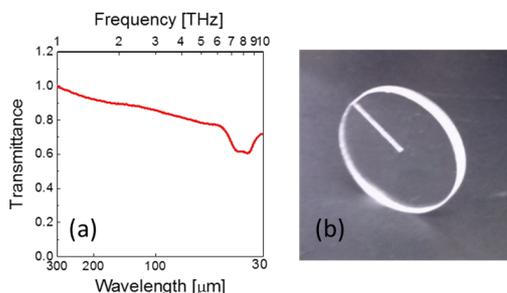


図1 (a) Tsurupica 樹脂のテラヘルツ帯における透過率 (b) テラヘルツ位相板の写真

$n=1.52@0.1-6\text{THz}$ )のが特徴である。テラヘルツ用螺旋型位相板を本研究で独自開発した周波数可変単色テラヘルツ光源に応用し、高効率テラヘルツ光渦の発生を行った。

4. 研究成果

開発したテラヘルツ波用連続螺旋型位相板の写真を図1(b)に示す。このテラヘルツ連続螺旋型位相板は、段差厚み約  $290\mu\text{m}$ 、周波数  $2\text{THz}$  において光渦の次数  $l=1$  となるように設計し作成した。位相板は方位角方向に対して同じ厚みとなるように機械研磨により作成し、設計値との誤差は約  $\pm 1\%$  以下である。位相板を用いてテラヘルツガウス光からテラヘルツ光渦を発生させた際の、モード解析シミュレーションを図2に示す。周波数に対して設計した位相板の周回方向の位相に  $\Delta$  の誤差が生じた場合、ガウスビームから変換されるラゲルガウスモードの変換効率を表している。位相板における誤差  $\Delta$  が  $\pm 0.1$  以下の場合、 $l=1$  および  $2$  におけるテラヘルツ光渦の変換効率はそれぞれ  $70\%$  以上、 $50\%$  以上である。また、高次の不要なモードへの変換効率は  $1\%$  以下とほぼ無視でき、高効率なテラヘルツ光渦の発生が実現できることがわかる。

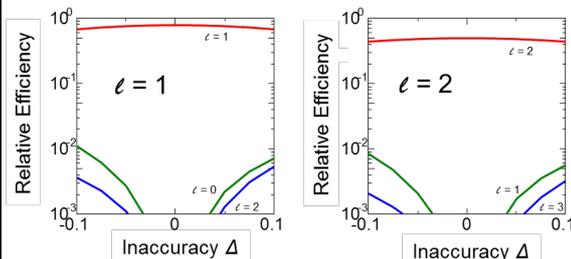


図2 位相板を用いた際に発生するテラヘルツ光渦のモード解析シミュレーション

設計したテラヘルツ用螺旋型位相板を周波数可変単色テラヘルツ光源に適用することで、テラヘルツ光渦の発生を試みた。その結果を、図3に示す。それぞれのテラヘルツ周波数に対応した、テラヘルツガウス光およびテラヘルツ光渦のビームプロファイルを示している。本実験では位相板を固定のままテラヘルツガウス光の周波数を  $2\text{THz}$  と  $4\text{THz}$  に同調させることで、光渦次数  $l=1$  および  $2$  のテラヘルツ光渦の発生に成功した。前述のとおり Tsurupica 樹脂はテラヘルツ帯においてほぼ一定の屈折率を有することから周波数を変化させるだけで、光渦次数の異なるテラヘルツ光渦の発生が可能であった。テラヘルツ光渦のビームプロファイルは、光渦特有のドーナツ型の強度分布を示し、波面中央部に位相が一意に決まらない特異点を示している。 $2\text{THz}$ 、 $l=1$  のテラヘルツ光渦の場合、約  $1\text{mm}$  の環状ビームに対して、位相特異点の大きさはテラヘルツ波長  $150\mu\text{m}$  ( $2\text{THz}$ ) より小さく約  $100\mu\text{m}$  であった。

また、傾けたレンズのように円筒座標系の対称性がない光学系によって光渦はエルミートガウスモードに変換することが知られ

ている。この際、現れるエルミートガウスの暗線の数からテラヘルツ波光渦の次数を求めることができる。今回の実験の場合、 $l=1$  および  $2$  であることが図3(c), (c')よりわかる。さらに、Gouy 位相シフトを応用して、光渦次数の符号を判別可能であり、テラヘルツ光渦の一部をガラスにより遮光し、この欠損部の伝搬に伴う回転方向を観測し光渦の符号を同定できた。

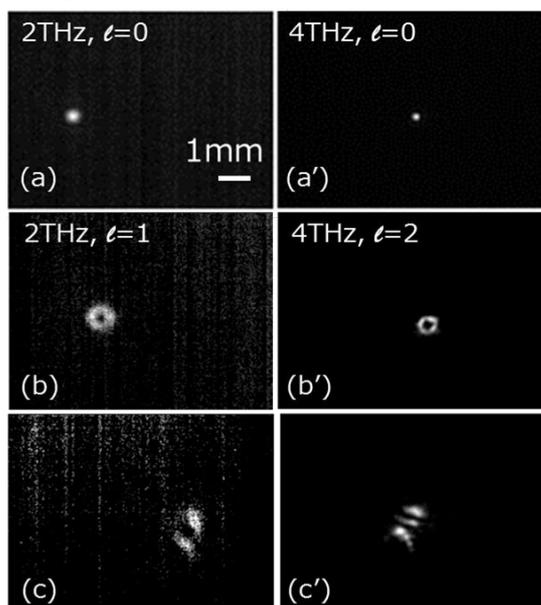


図3 2,4 THzにおけるテラヘルツガウス光およびテラヘルツ光渦のモードプロファイル

本研究では、これまで発生が難しかったテラヘルツ領域における光渦の発生に注力して研究を行ってきた。Tsurupica樹脂を用いて高効率変換可能なテラヘルツ用位相板を開発し、周波数可変テラヘルツ光源へと応用することでテラヘルツ光渦の発生に成功した。また、テラヘルツ光渦の次数および符号の両方についてテラヘルツカメラを用いた測定により特定できた。今後、高強度なテラヘルツ光渦を用いて飽和吸収をはじめとする非線形応答を示す材料に適用することで、超高解像テラヘルツ顕微鏡への応用が大きく期待される。

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕(計 8 件)

- A. M. Mahjoub, S. Suzuki, T. Ouchi, N. Aoki, K. Miyamoto, T. Yamaguchi, T. Omatsu, K. Ishibashi, Y. Ochiai, "Terahertz bolometric detection by thermal noise in graphene FET," Appl. Phys. Lett., 107 (8), 083506 (2015). 査読有  
DOI:10.1063/1.4929768  
T. Akiba, N. Kaneko, K. Suizu, K. Miyamoto, T. Omatsu, "Real-time terahertz wave

sensing via infrared detection interacted with evanescent terahertz waves," Opt. Rev., 22, 1, 166-169 (2015). 査読有

DOI:10.1007/s10043-015-0022-8

T. Akiba, Y. Seki, M. Odagiri, I. Hashino, K. Suizu, Y. H. Avetisyan, K. Miyamoto and T. Omatsu, "Terahertz wave generation using type II phase matching polarization combination via difference frequency generation with LiNbO<sub>3</sub>," Jpn. J. Appl. Phys., 54, 6, 062202/1-4 (2015). 査読有  
<http://iopscience.iop.org/article/10.7567/JJA.P54.062202/meta>

K. Miyamoto, K. Suizu, T. Akiba, T. Omatsu, "Direct observation of the topological charge of a terahertz vortex beam generated by a Tsurupica spiral phase plate," Appl. Phys. Lett., 104, 261104/1-4 (2014). 査読有  
DOI:10.1063/1.4886407

T. Akiba, Y. Akimoto, M. Tamura, K. Suizu, K. Miyamoto, T. Omatsu, J. Takayanagi, T. Takada, K. Kawase, "Broadband THz-wave generation by satisfying the noncollinear phase-matching condition with a reflected signal beam," Appl. Opt., 52, 34, 8305-8309, (2013). 査読有

DOI:10.1364/AO.52.008305

T. Akiba, N. Kaneko, K. Suizu, K. Miyamoto, T. Omatsu, "THz-wave sensing via pump and signal waves detection interacted with evanescent THz-wave," Opt. Lett., 38, 18, 3687-3689 (2013). 査読有

DOI:10.1364/OL.38.003687

K. Miyamoto, A. J. Lee, T. Saito, T. Akiba, K. Suizu, T. Omatsu, "Broadband terahertz light source pumped by a 1μm picosecond laser," Appl. Phys. B, 110, 3, 321-326 (2013). 査読有

DOI:10.1007/s00340-013-5359-8

尾松孝茂, 宮本克彦, "テラヘルツ光渦の発生と観測," 光アライアンス, 26 (1), 6-9 (2015). 査読無

〔学会発表〕(計 15 件)

T. Yano, T. Abe, N. Kaneko, K. Suizu, K. Miyamoto, T. Omatsu, "Tunable picosecond terahertz light source," International symposium on frontiers in THz technology (FTT 2015), Pos2.15 (Congress Center in ACT City Hamamatsu, Hamamatsu, Japan, 2015.09.01.).

K. Suizu, N. Kaneko, T. Akiba, K. Miyamoto, T. Omatsu, "Novel THz-wave detection technique via interaction between optical pumping waves and THz-wave generated by Cherenkov phase matching," The 11th Conference on Lasers and Electro-Optics Pacific-Rim (CLEO-PR 2015), 28B1-2 (Busan, Korea, 2015.8.25-28.).

K. Miyamoto, B. J. Kang, W.-T. Kim, F.

Rotermund, T. Omatsu, “Broadband THz vortex pulse generation by a Tsurupica spiral phase plate,” The 11th Conference on Lasers and Electro-Optics Pacific-Rim (CLEO-PR 2015), 28B1-4 (Busan, Korea, 2015.8.25-28.).

K. Miyamoto, K. Suizu, T. Akiba, T. Omatsu, “Tsurupica spiral phase plate for terahertz vortex generation,” International Symposium on Physics and Applications of Laser Dynamics 2014 (IS-PALD 2014), P4. (National Chiao Tung University, Hsinchu, Taiwan, 2014.9.4.).

T. Akiba, N. Kaneko, K. Suizu, K. Miyamoto, T. Omatsu, “Real-time THz-wave spectroscopy via infrared lights detection interacted with evanescent THz waves,” Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO 2014), JTh2A (San Jose Convention Center, San Jose, Calif, America, 2014.06.12.).

A. Mahjoub, S. Suzuki, Y. Iso, T. Ouchi, N. Aoki, K. Miyamoto, T. Yamaguchi, T. Omatsu, J.P. Bird, D.K. Ferry, K. Ishibashi, Y. Ochiai, “Room Conditions THz Detector Using Graphene FET,” The 38th International Conference on Infrared, Millimeter and Terahertz Waves (IRMMW-THz 2013), Mo4-4, (Mainz on the Rhine, Mainz, Germany, 2013.9.4.).

K. Miyamoto, K. Suizu, T. Saito, T. Akiba, T. Omatsu, “Widely Tunable (1-15THz), Narrowband Picosecond Terahertz Light Source,” The 10th Conference on Lasers and Electro-Optics Pacific Rim, and The 18th OptoElectronics and Communications Conference (CLEO-PR 2013), MC1-6, (Kyoto, Japan, 2013.7.1.).

水津光司, 水野光貴, 木村優基, 南部広樹, 秋葉拓也, 宮本克彦, 尾松孝茂, 諸橋功, 小川洋, 中島慎也, 関根徳彦, 竇迫巖, “励起光状態変化によるテラヘルツ波検出技術および導波路導入による高効率化,” 第 63 回応用物理学会春季学術講演会 21p-H135-7, (東工大 大岡山キャンパス, 東京, 日本, 2016.03.21.).

宮本克彦, 矢野貴義, 佐野和貴, 山崎智仁, Kang Bong Joo, Kim Won-tea, Rotermund Fabian, 水津光司, 尾松孝茂, “広帯域テラヘルツ光渦の発生,” 第 76 回応用物理学秋季学術講演会 16a-2J-10, (名古屋国際会議場, 名古屋, 愛知, 日本, 2015.9.16.).

内田裕久, 矢野貴義, 佐野和貴, 山崎智仁, 宮本克彦, 水津光司, 尾松孝茂, “熱レンズ効果による有機非線形光学結晶のレーザー照射耐性評価,” 第 76 回応用物理学秋季学術講演会 16a-2J-7 (名古屋国際会議場, 名古屋, 愛知, 日本, 2015.9.16.). 内田裕久, 宮本克彦, 水津光司, 尾松孝

茂, “単色ピコ秒 THz 発生における DAST 結晶の特性評価,” 日本光学会年次学術講演会 Optics & Photonics Japan 2014, 7aB10, (筑波大学東京キャンパス, 文京区, 東京, 日本, 2014.11.05.).

宮本克彦, 水津光司, 秋葉拓也, 尾松孝茂, “連続螺旋型位相板を用いたテラヘルツ光渦の発生およびモード解析,” 第 75 回秋季応用物理学会秋季学術講演会, 19p-C6-11, (北海道大学札幌キャンパス, 札幌, 北海道, 日本, 2014.09.19.).

宮本克彦, 梅本翔太, 時実 悠, 水津光司, 尾松孝茂, “単色テラヘルツ光渦の発生,” 第 61 回応用物理学会春季学術講演会, 17p-E17-13, (青山学院大学相模原キャンパス, 神奈川, 2014.3.17.).

秋葉拓也, 秋元康尋, 田村基晃, 水津光司, 高柳順, 宮本克彦, 尾松孝茂, “端面反射位相整合による広帯域 THz 波光源の開発,” 第 61 回応用物理学会春季学術講演会, 17p-E17-12, (青山学院大学相模原キャンパス, 神奈川, 2014.3.17.).

宮本克彦, 水津光司, 秋葉拓也, 尾松孝茂, “波長可変(1-15THz)狭線幅ピコ秒テラヘルツ発生,” 第 74 回応用物理学会秋季学術講演会, 17p-A14-5 (同志社大学京田辺キャンパス, 京都, 2013.9.17.).

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

出願状況(計 1 件)

名称: 光渦発生装置及びこれに用いられる連続螺旋型位相版並びに光渦発生方法

発明者: 宮本克彦、尾松孝茂、工藤朗人

権利者: 千葉大学

種類: 特願

番号: 2014-039285

出願年月日: 2014/2/28

国内外の別: 国内

取得状況(計 0 件)

〔その他〕

ホームページ等

<http://physics.tp.chiba-u.jp/~omatsu/index.html>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

宮本 克彦 (MIYAMOTO Katsuhiko)

千葉大学・大学院融合科学研究科・准教授

研究者番号: 20375158

(2) 研究分担者

無し

(3) 連携研究者

尾松 孝茂 (OMATSU Takashige)

千葉大学・大学院融合科学研究科・教授

研究者番号: 30241938